Journal of Metallurgical and Materials Engineering, 36, 2. 2025. (31-44)


Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Metallurgical and Materials Engineering

https://jmme.um.ac.ir


Iron&Steel Society of Iran

Investigating Wear and Mechanical Behavior of A380 Aluminum Hybrid Nanocomposite Reinforced with Graphene Nanosheets and SiC Nanoparticles*

Research Article

Mohammad Alipour[1]

DOI: 10.22067/jmme.2025.86140.1138

1- Introduction

There is a huge number of published results and researches on the mechanical properties and wear behavior of aluminum-based nanocomposites. According to these researches, the wear behavior and mechanical properties of the nanocomposite are improved by adding a reinforcing phase. The aim of the current study is to produce hybrid nanocomposites with AlA380 matrix reinforced with graphene nanosheets (0, 0.25, 0.5, 0.75 and 1 wt.%) and silicon carbide nanoparticles (0.5 wt.%). AlA380 alloy is chosen as the matrix material due to its hardness and good wear properties. In addition, it is a lightweight alloy compared to brass, copper and steel alloys. AlA380-GNPs-SiCnp nanocomposites were produced by a combination of powder metallurgy and spark plasma sintering (SPS) furnace. AlA380 with and without graphene nanosheets and silicon carbide nanoparticles will be subjected to wear tests to evaluate the wear resistance.

2- Experimental

AlA380 aluminum powder with an average particle size of 20 μm was used as raw materials. Different percentages of graphene nanosheets (0.00, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00%) and a fixed percentage of SiC nanoparticles (0.5 wt.%) were added to the A380 aluminum alloy powder. The AlA380 and GNPs-SiC np mixture was then milled in a high-energy ball mill for 10 h at 250 rpm with a ball-to-powder mass ratio of 1:10 under argon atmosphere. Stearic acid flakes (2 wt.%) were added as a process control agent. To prevent overheating and sticking of the powder mixture, ball milling was continued for 30 min with a 15 min rest period in each milling cycle. The samples were subjected to SPS process at 540°C with a heating rate of 50°C/min and a pressure of 40 MPa for a holding time of 10 min and then cooled by a water circulation system in the furnace. The mold size used for sintering the samples was 15 mm × 10 mm. Three samples for each percentage were prepared using the process described above. Scanning electron microscope (SEM) was used to perform SEM images and EDS analysis of the nanocomposite powders and samples (model: TE Scan Mira 3- Czech). Hardness test according to ASTM E10 standard was used to investigate the resistance of the nanocomposite to plastic deformation (ESEWAY 7500, force 30 kg and indentation diameter 2.5 mm). Dry sliding wear tests according to ASTM G99 standard were performed using a pin on a disc adjusted at room temperature. The counter plate used was a 100Cr6 steel disc with a hardness of 62 Rockwell C. Pins with a diameter of 5 mm and a length of 10 mm were in contact with a steel disk. All samples were tested at a rotational speed of 250 rpm, which corresponds to a speed of 0.5 m/s, under nominal loads of 10 N. A constant sliding distance of 1000 m was chosen to test all samples. The mass of all samples before and after the wear test was recorded using an electronic balance (Make: GR200-AND) with an accuracy of 0.1 mg.

3- Results and Discussion

Table 1 shows the hardness results of unmodified and nanocomposite samples. The slight improvement in hardness of nanocomposite samples can be the result of effective dispersion of graphene nanosheets and SiC nanoparticles in the matrix. As expected, the hardness values of nanocomposite samples are higher than those of unmodified samples.

Table 1. Hardness results of different nanocomposite samples.

Sample	Hardness (Hv)
A380	105
Al A380-0.5%SiC-0.25% GNPs	141
Al A380-**0.5%SiC**-0.5% GNPs	175
Al A380-**0.5%SiC**-0.75% GNPs	121
Al A380-**0.5%SiC**-1% GNPs	115

The coefficients of friction (COF) under 10 N loading conditions for different nanocomposites with different weight percentages of graphene nanosheets and a fixed percentage of silicon carbide nanoparticles are shown in Table 2. It is observed that at a given applied load, the friction coefficients are the highest for the unreinforced

*Manuscript received December 30, 2023, Revised January 24, 2024, Accepted May 10, 2025.

[1] Corresponding author: Faculty of Mechanical engineering, Department of Materials Engineering, University of Tabriz, Iran
Email: alipourmo@tabrizu.ac.ir

nanocomposites. The friction coefficients decrease with increasing weight percentage of GNP. This is due to the presence of reinforced nanoparticles in the nanocomposite. The highest amount of damage to the sample is for the case where no reinforcement is used. Hence, the amount of residual wear products should be the main reason for the large COF. The reinforcement of graphene nanosheets has reduced the COF due to its self-lubricating property. During wear, the graphene nanosheets separate from the nanocomposite and create a lubricating layer on the surface between the two materials, which reduces the friction coefficient. The more graphene nanosheets are uniformly dispersed within the matrix, the more it improves the stiffness of the nanocomposite, reducing the coefficient of friction and reducing the amount of wear. In addition, for nanocomposites, due to their higher mechanical properties, it is easier to maintain the stability of the surface oxide layer, thus resulting in relatively less fluctuation.

The wear results for A380 aluminum alloy for unmodified and nanocomposites are shown in Table 5. Table ۳ shows the weight loss. These results were obtained at a constant load (10 N) and a constant disk rotation speed (250 rpm). It is observed that the weight loss decreased with increasing graphene content. From Table 5, it is clear that the addition of graphene nanosheets and SiC nanoparticles to A380 aluminum alloy reduced the weight loss compared to the unmodified aluminum alloy. This can be attributed to the uniform distribution and dispersion of graphene nanosheets and SiC nanoparticles in the nanocomposites modified with 0.5 wt. % graphene.

Table 2. Coefficient of friction for AlA380 alloy and nanocomposites for different weight percentages of graphene

Sample	Coefficient of friction
A380	0.689
Al A380-0.5%SiC-0.25% GNPs	0.521
Al A380-**0.5%SiC-**0.5% GNPs	0.455
Al A380-**0.5%SiC-**0.75% GNPs	0.561
Al A380-**0.5%SiC-**1% GNPs	0.571

Table 3. Weight loss as a function of GNPs content for unrefined and refined nanocomposites

Sample	Weight loss(mg)
A380	6
Al A380-0.5%SiC-0.25% GNPs	2.4
Al A380-**0.5%SiC-**0.5% GNPs	2
Al A380-**0.5%SiC-**0.75% GNPs	2.1
Al A380-**0.5%SiC-**1% GNPs	2.3

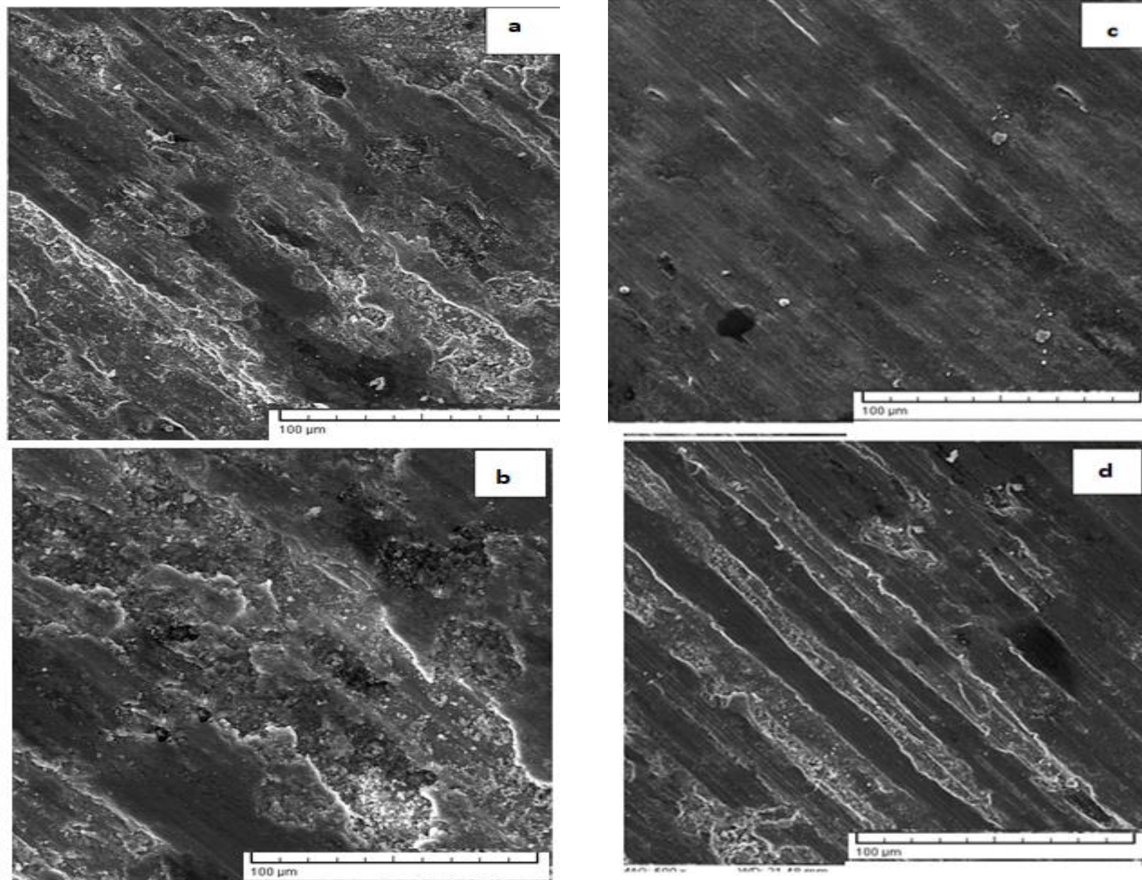


Fig. 1 SEM images of worn surfaces of (a) pure AlA380, (b) 0.25 wt. %GNP, (c) 0.5 wt.% GNP and (e) 1.0 wt.% GNP tested under 10 N applied load.

4- Conclusions

Figure 1 shows the wear morphology of the investigated nanocomposite under 10 N loading conditions. The degree of surface damage of the graphene/Al A380 composite decreases with increasing the reinforcement content up to 0.5 wt. %. In this case, the graphene layers come to the surface and act as a lubricant during wear, reducing the wear rate and friction coefficient. According to these results, the more graphene content is greater than 0.5 wt. % of graphene, the greater the wear rate due to the reduction in hardness and the separation of agglomerated particles that have weak bonding energy with the surface, so lubrication is not performed well.

In this study, A380 aluminum matrix nanocomposites reinforced with GNPs-SiC np were produced and the microstructural, mechanical and tribological behavior of these nanocomposites were investigated. The experimental findings are summarized as follows:

1- The optimal amount of nanoparticles is 0.5 wt% GNP.

2- When the weight percentage of the nanocomposite reaches more than 0.5 wt%. The aggregation of GNPs at the grain boundary causes brittleness, porosity, less surface bonding and consequently a decrease in mechanical properties.

3- The addition of nano-reinforcement significantly improved the wear resistance of the nanocomposites.

4- However, excessive increase in the amount of graphene causes aggregation and agglomeration, thus increasing the COF and wear rate.

5- The wear resistance of the produced nanocomposites is higher than that of the base sample and the weight reduction of the base sample is 3 times compared to the optimal sample. The friction coefficient due to the self-lubricating nature of graphene for the base sample and the nanocomposite containing 0.5 wt.% graphene is 0.689 and 0.455, respectively, which indicates a decrease in the friction coefficient. Also, the hardness of the samples increases from 105 Vickers for the base sample to 175 Vickers for the sample containing 0.5 wt.% graphene.

6- There was a transition of the wear mechanism from a combination of lamellar wear, adhesive wear and abrasive wear to mild abrasive wear with an increase in the reinforcing content of graphene nanosheets up to 0.5 wt.%.

7- Increasing the graphene content was beneficial for the formation of MML during the dry sliding process, which can not only protect the worn surface but also reduce the COF of the nanocomposites.



مهندسی متالورژی و مواد

https://jmme.um.ac.ir/



بررسی رفتار سایشی و مکانیکی نانوکامپوزیت هیبریدی آلومینیوم A380 تقویت شده با نانوصفحات گرافن و نانوذرات SiC*

مقاله پژوهشی

محمد علی پور(۱)

DOI: 10.22067/jmme.2025.86140.1138

چکیده *هدف از این تحقیق بررسی ریزساختار و رفتار سایشی نانوکامپوزیت آلیاژ آلومینیوم AlA380 تقویت شده با نانوصفحات گرافن (GNPs) و نانوذرات SiC تولید شده به روش آسیاب گلوله‌ای و کوره تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای (SPS) است. درصد نانوذرات SiC ثابت و درصد نانوصفحات گرافن متغییر در نظر گرفته شد. نانوصفحات گرافن با درصدهای ۰٫۲۵، ۰٫۵، ۰٫۷۵ و ۱ درصد وزنی و نانوذرات SiC در ۰٫۵ درصد وزنی به نانوکامپوزیت اضافه شدند. وجود GNP های پراکنده با سطح ویژه بالا به طور قابل توجهی استحکام و سختی کامپوزیت‌ها را افزایش می‌دهد. مطالعات ریزساختاری آلیاژ نشان داد که افزودن GNPs تا ۰٫۵ درصد وزنی اندازه دانه را کاهش می‌دهد، اما افزودن مقدار GNP بیشتر (۱ درصد وزنی GNPs) اندازه دانه را به طور قابل توجهی تغییر نمی‌دهد. در مقادیر بالاتر GNP، وجود آگلومره گرافن در مرزهای دانه‌ها مسیر مطلوبی برای رشد ترک است. مقدار بهینه نانوصفحات ۰٫۵ درصد وزنی به دست آمد. مقاومت در برابر سایش نانوکامپوزیت‌های تولید شده نسبت به نمونه پایه بیشتر بوده و کاهش وزن نمونه پایه نسبت به نمونه بهینه ۳ برابر می‌باشد. ضریب اصطکاک به دلیل ماهیت خودروان‌کننده گرافن برای نمونه پایه و نانوکامپوزیت حاوی ۰٫۵ درصد وزنی گرافن به ترتیب برابر است با ۰٫۶۸۹ و ۰٫۴۵۵ که نشان دهنده کاهش ضریب اصطکاک می‌باشد. همچنین سختی نمونه‌ها از ۱۰۵ ویکرز برای نمونه پایه به ۱۷۵ ویکرز برای نموه حاوی ۰٫۵ درصد وزنی گرافن افزایش می‌یابد.*

واژه‌های کلیدی نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم، رفتار سایشی، خواص مکانیکی، ریزساختار، گرافن، کاربید سیلسیم.

Investigating Wear and Mechanical Behavior of A380 Aluminum Hybrid Nanocomposite Reinforced with Graphene Nanosheets and SiC Nanoparticles

Mohammad Alipour

Abstract *The purpose of this research is to investigate the microstructure and wear behavior of AlA380 alloy nanocomposite reinforced with graphene nanoplates (GNPs) and SiC nanoparticles produced by ball milling and spark plasma sintering furnace (SPS). The percentage of SiC nanoparticles was fixed and the percentage of graphene nanosheets was considered variable. Graphene nanosheets with percentages of 0.25, 0.5, 0.75 and 1% by and SiC nanoparticles at 0.5% by weight were added to the nanocomposite. The presence of dispersed GNPs with high specific surface area significantly increases the strength and hardness of composites. Microstructural studies of the alloy showed that the addition of GNPs up to 0.5 wt% reduced the grain size, but the addition of a higher amount of GNPs (1 wt%) did not significantly change the grain size. At higher GNP values, the presence of graphene agglomerates at the grain boundaries is a favorable path for crack growth. The optimal amount of nanosheets was 0.5% by weight. The wear resistance of the produced nanocomposites is higher than the base sample and the weight reduction of the base sample is 3 times compared to the optimal sample. Due to the self-lubricating nature of graphene, the friction coefficient for the base sample and the nanocomposite containing 0.5% by weight of graphene is 0.689 and 0.455, respectively, which indicates a reduction in the friction coefficient. Also, the hardness of the samples increases from 105 Vickers for the base sample to 175 Vickers for the sample containing 0.5% by weight of graphene.*

Keywords Aluminum-based nanocomposite, Wear behavior, Mechanical properties, Microstructure, Graphene, Silicon carbide.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۱۰/۹ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۲/۲۱ می‌باشد.

(۱) استادیار، مهندسی مواد، دانشکده مکانیک، گروه مهندسی مواد، دانشگاه تبریز.

Email: alipourmo@tabrizu.ac.ir

مقدمه

تقاضا برای کاهش هزینه در حوزه حمل و نقل مانند صنایع خودرو یا هوافضا، کاهش مصرف سوخت را می‌طلبد که به نوبه خود با کاهش وزن قابل دستیابی است. از این نظر آلومینیوم و آلیاژهای آن به دلیل چگالی کم، استحکام بالا و شکل‌پذیری خوب کاندیدای اصلی برای این نوع کاربردها هستند. گرافن به عنوان یک کلاس نوظهور از نانوساختارهای کربنی به دلیل ویژگی‌های مکانیکی برجسته‌اش مورد توجه زیادی قرار گرفته است [1,2]. به دلیل نانوساختار دو بعدی و سطح ویژه بالاتر، نانوصفحات گرافن (GNPs) از نظر استحکام بهتر از نانولوله‌های کربنی (CNTs) عمل می‌کنند [3-6]. در نتیجه، GNPها به عنوان یک گزینه نانو تقویت کننده مؤثر برای کامپوزیت‌های سبک قوی، به ویژه در صنایع هوانوردی و فضانوردی ظاهر شده‌اند [7]. آلومینیوم و آلیاژهای آن به عنوان پرمصرف‌ترین فلز ساختاری سبک وزن، دارای ویژگی‌هایی مانند استحکام ویژه بالا، قابلیت بازیافت خوب، ماشین‌کاری عالی و هزینه کم هستند. با این حال، سختی پایین‌تر و مقاومت ضعیف در برابر سایش Al و آلیاژهای آن به شدت کاربرد آتی آن را در شرایط خدمات غیر قابل پیش‌بینی و تقاضا در زمینه فناوری پیشرفته با مشکل مواجه کرده است [8,9]. اگر چه روش‌های مقاوم‌سازی سنتی مانند عملیات حرارتی و کار سرد می‌توانند خواص مکانیکی Al و آلیاژهای آن را تا حدی افزایش دهند، اما برای افزایش مقاومت سایشی مناسب نیستند [10]. در نتیجه، به منظور دستیابی به هدف بهبود قابل توجه خواص مکانیکی و سایشی Al و آلیاژهای آن، چندین محقق مطالعه خود را بر روی کامپوزیت‌های زمینه Al (AMCs) متمرکز کرده‌اند [9,11-13]. بارتولوچی و همکاران [14] جزو اولین کسانی بودند که در سال ۲۰۱۱ از آسیاب گلوله‌ای برای ترکیب گرافن در نانوکامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم استفاده کردند.

تحقیقات زیادی در مورد خواص مکانیکی و رفتار سایش نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر آلومینیوم انجام شده است. بر اساس این تحقیق، با افزودن فاز تقویت کننده، رفتار سایشی و خواص مکانیکی نانوکامپوزیت بهبود می‌یابد [15-22].

در این تحقیق هدف تولید نانوکامپوزیت‌های هیبریدی با زمینه AlA380 تقویت شده با نانوصفحات گرافن (۰، ۰,۲۵، ۰,۵، ۰,۷۵ درصد و ۱ درصد وزنی) و نانوذرات کاربید سیلیسیم (۰,۵ درصد وزنی) می‌باشد. آلیاژ AlA380 به دلیل سختی و خواص سایش خوب به عنوان ماده زمینه انتخاب می‌شود. علاوه بر این، این یک آلیاژ سبک در مقایسه با آلیاژ برنج، مس و فولاد است. نانوکامپوزیت‌های AlA380-GNPs-SiCnp با ترکیبی از متالورژی پودر و کوره تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای (SPS) تولید شدند. AlA380 با و بدون نانوصفحات گرافن و نانوذرات کاربید سیلیسیم تحت آزمایش سایش برای ارزیابی مقاومت به سایش قرار خواهند گرفتند.

روش تحقیق

مواد و روش‌ها

پودر آلومینیوم AlA380 با اندازه ذرات متوسط ۲۰ میکرومتر به دست آمد. شکل پودر آلومینیوم خام AlA380 کروی است. جدول (۱) ترکیبات شیمیایی AlA380 را فهرست می‌کند. GNP با خلوص ۹۹,۹ درصد در ۵–۱۲ لایه و صفحات با قطر ۱–۲۰ میکرون تهیه شد. نانوذرات SiC با خلوص ۹۹,۹ درصد با قطر ۷۰ نانومتر تهیه شد.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی آلیاژ Al 380 به عنوان ماده پایه

Substance	Al	Si	Cu	Fe	Zn	Mn
Wt.%	Bal	8.5	3.5	1.3	3.0	0.5

آماده‌سازی Al A380/SiCnp-GNPs

درصدهای مختلف نانوصفحات گرافن (۰,۰۰، ۰,۲۵، ۰,۵۰، ۰,۷۵، ۱,۰۰ درصد) و درصد ثابت نانوذرات SiC (۰,۵ درصد وزنی) به پودر آلیاژ آلومینیوم A380 اضافه شد. مخلوط Al A380 و GNPs-SiCnp سپس در یک آسیاب گلوله‌ای پر انرژی به مدت ۱۰ ساعت در ۲۵۰ دور در دقیقه با نسبت جرم توپ به پودر ۱:۱۰ در اتمسفر آرگون آسیاب شد. تکه‌های اسید استئاریک (۲ درصد وزنی) به عنوان یک عامل کنترل فرایند اضافه شد. برای جلوگیری از گرم شدن بیش از حد و چسبیدن مخلوط پودر، هر ۳۰ دقیقه آسیاب گلوله‌ای با ۱۵ دقیقه استراحت در هر چرخه آسیاب ادامه پیدا کرد. نمونه‌ها در دمای ۵۴۰ درجه سانتی‌گراد با سرعت حرارت ۵۰ درجه سانتی‌گراد در دقیقه و فشار ۴۰ مگاپاسکال برای مدت زمان نگهداری ۱۰ دقیقه تحت فرایند SPS قرار گرفتند سپس توسط سیستم گردش آب در کوره خنک شدند.

اندازه قالب استفاده شده برای تف‌جوشی نمونه‌ها φ15 میلی‌متر × ۱۰ میلی‌متر بود. سه نمونه برای هر درصد با استفاده از فرایند توضیح داده شده در بالا تهیه شد.

مشخصه‌یابی

میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای انجام تصاویر SEM و آنالیز EDS از پودرها و نمونه‌های نانوکامپوزیت (مدل TEScan Mira 3- Czech) استفاده شد. آزمون سختی بر اساس استاندارد ASTM E10 برای بررسی مقاومت نانوکامپوزیت در برابر تغییر شکل پلاستیک (ESEWAY 7500، نیروی ۳۰ کیلوگرم و فرورفتگی قطر ۲٫۵ میلی‌متر) استفاده شد. آزمون‌های سایش لغزشی خشک مطابق با استاندارد ASTM G99 با استفاده از یک پین روی دیسک تنظیم شده در دمای اتاق انجام شد. صفحه مقابل استفاده شده، دیسک فولادی 100Cr6 با سختی ۶۲ راکول سی بود. پین‌ها به قطر ۵ میلی‌متر و طول ۱۰ میلی‌متر در تماس با دیسک فولادی بودند. همه نمونه‌ها با سرعت چرخشی ۲۵۰ دور در دقیقه، که مربوط به سرعت ۰٫۵ متر بر ثانیه است، تحت بارهای اسمی ۱۰ نیوتن مورد آزمایش قرار گرفتند. فاصله لغزشی ثابت ۱۰۰۰ متر برای آزمایش همه نمونه‌ها انتخاب شد. جرم تمام نمونه‌ها قبل و بعد از آزمون سایش با استفاده از ترازوی الکترونیکی (Make: GR200-AND) با دقت ۰٫۱ میلی گرم ثبت شد.

نتایج و بحث

مطالعات ریزساختاری

ذرات آلومینیوم آلیاژی A380 اولیه، که در شکل (۱–الف) نشان داده شده‌اند، کروی‌شکل هستند و قطری در حدود ۴۰ میکرومتر دارند و ذرات آلومینیوم در شکل (۱–ب) پس از ۱۰ ساعت آسیاب گلوله‌ای به صورت ورقه‌ای صاف درآمده‌اند. شکل (۱–ج) و (۱–د) نیز نانوذرات کاربید سیلسیم و نانوصفحات گرافن را به روی پودر آلومینیم بعد از ۱۰ ساعت آسیاب نشان می‌دهد. توزیع فاز تقویت کننده در نمونه‌ها با استفاده از نقشه‌برداری اشعه ایکس تعیین شد. شکل (۲) توزیع عناصر C و Si در نمونه‌ها را که به صورت توزیع یکنواخت در زمینه آلومینیوم A380 پس از تف جوشی است نشان می‌دهد. در حالی که افزایش درصد وزنی به بیش از ۰٫۵ درصد نانوصفحات گرافن باعث آگلومره شدن نانوصفحات می‌شود. دلیل توزیع یکنواخت استفاده از روش آسیاب گلوله‌ای برای پخش نانوصفحات گرافن در زمینه آلیاژ آلومینیوم است.

در شکل (۳) ریزساختار نانوکامپوزیت در درصدهای مختلف گرافن نشان داده شده است. در این شکل فاز خاکستری آلومینیوم است. تخلخل‌ها و تراکم فاز تقویتی در مرزهای دانه Alبه صورت مناطق سیاه‌رنگ دیده می‌شوند، همان طور که در شکل (۳ ـ د) و (۳ ـ ه) نشان داده شده است. در آلومینیوم تقویت شده با گرافن که می‌توان آن را در تصاویر SEM به عنوان مناطق تاریک تشخیص داد که در امتداد مرزهای دانه Al نفوذ کرده و باعث تراکم قابل توجهی می‌شود.

جدول (۲) تأثیر مقادیر مختلف نانوصفحات گرافن را بر میانگین اندازه دانه نمونه‌ها بعد از تف‌جوشی نشان می‌دهد. مطالعه نمونه‌ها وجود ویژگی‌های ریزساختاری متفاوتی را نشان داد که ممکن است منجر به خواص مکانیکی متفاوتی شود. از جدول (۲) مقادیر بهینه نانوصفحات گرافن ۰٫۵ درصد وزنی تعیین شد. چندین مکانیسم برای فرایند اصلاح دانه پیشنهاد شده است. در برخی مکانیسم‌ها وجود مقداری ذره به عنوان مؤثر در فرایند اصلاح دانه شناخته شده است.

جدول ۲ اندازه دانه در درصدهای مختلف نانوصفحات گرافن

Sample	Grain size (micron)
A380	150±30
Al A380-0.5%SiC-0.5% GNPs	70±15
Al A380-0.5%SiC-0.75% GNPs	72±13
Al A380-0.5%SiC-1% GNPs	83±15

سختی

جدول (۳) نتایج سختی نمونه‌های اصلاح نشده و نمونه‌های نانوکامپوزیت را نشان می‌دهد. بهبود جزئی در سختی نمونه‌های نانوکامپوزیت می‌تواند نتیجه پراکندگی مؤثر نانو صفحات گرافن و نانوذرات SiC در زمینه باشد. همان طور که انتظار می‌رفت، مقادیر سختی نمونه‌های نانوکامپوزیت بالاتر از نمونه‌های اصلاح نشده است.

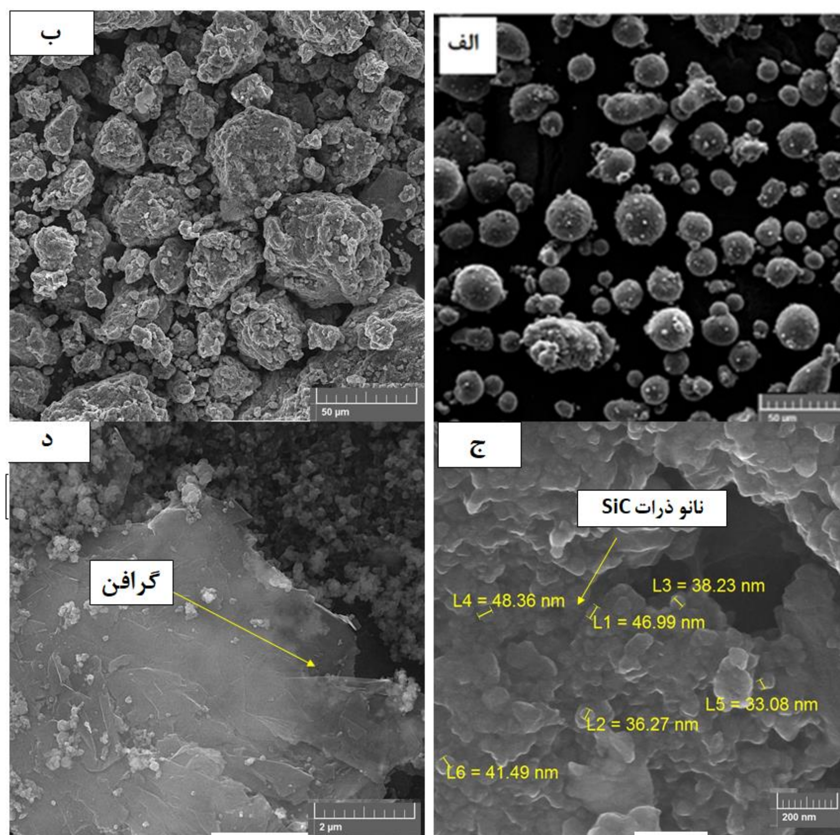
جدول ۳ نتایج سختی نمونه‌های مختلف نانوکامپوزیت

Sample	Hardness (Hv)
A380	105
Al A380-0.5%SiC-0.25% GNPs	141
Al A380-0.5%SiC-0.5% GNPs	175
Al A380-0.5%SiC-0.75% GNPs	121
Al A380-0.5%SiC-1% GNPs	115

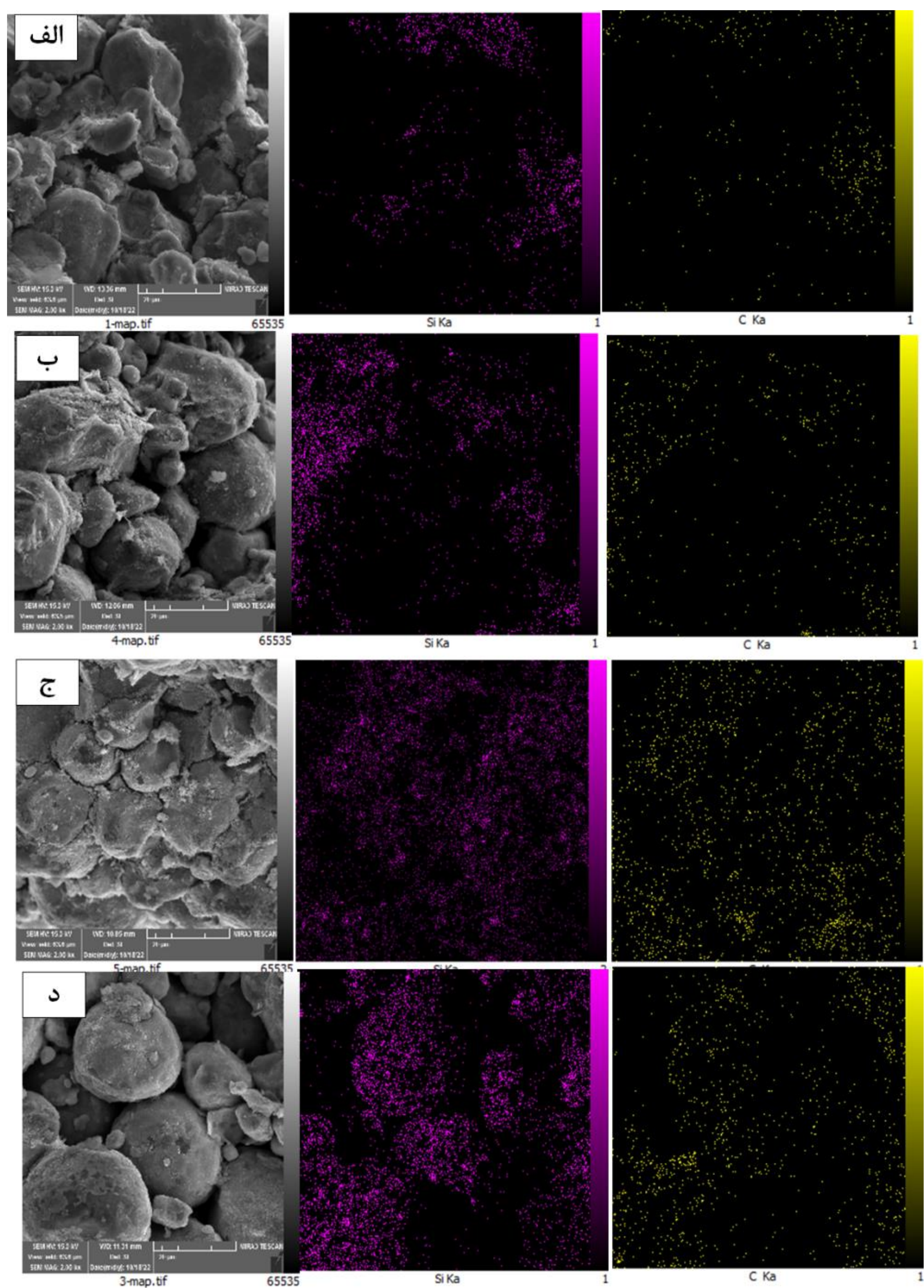
رفتار سایشی

ضرایب اصطکاک (COF) تحت شرایط بارگذاری ۱۰ نیوتن برای نانوکامپوزیت‌های مختلف با درصدهای وزنی مختلف نانوصفحات گرافن و درصد ثابت نانوذرات کاربید سیلسیم در جدول (۴) نشان داده شده است. مشاهده شده است که در یک بار اعمال شده معین، ضرایب اصطکاک برای نانوکامپوزیت‌های تقویت نشده بیشترین مقدار است. ضرایب اصطکاک با افزایش درصد وزنی GNP کاهش می‌یابد. این به دلیل وجود نانوذرات تقویت شده در نانوکامپوزیت است. بیشترین مقدار آسیب نمونه برای حالتی می‌باشد که هیچ تقویت کننده‌ای استفاده نشده است. از این رو، مقدار محصولات سایش باقی مانده باید دلیل اصلی بزرگ بودن COF باشد. تقویت کننده نانوصفحات گرافن به دلیل خاصیت خودروان‌کاری COF را کاهش داده است.

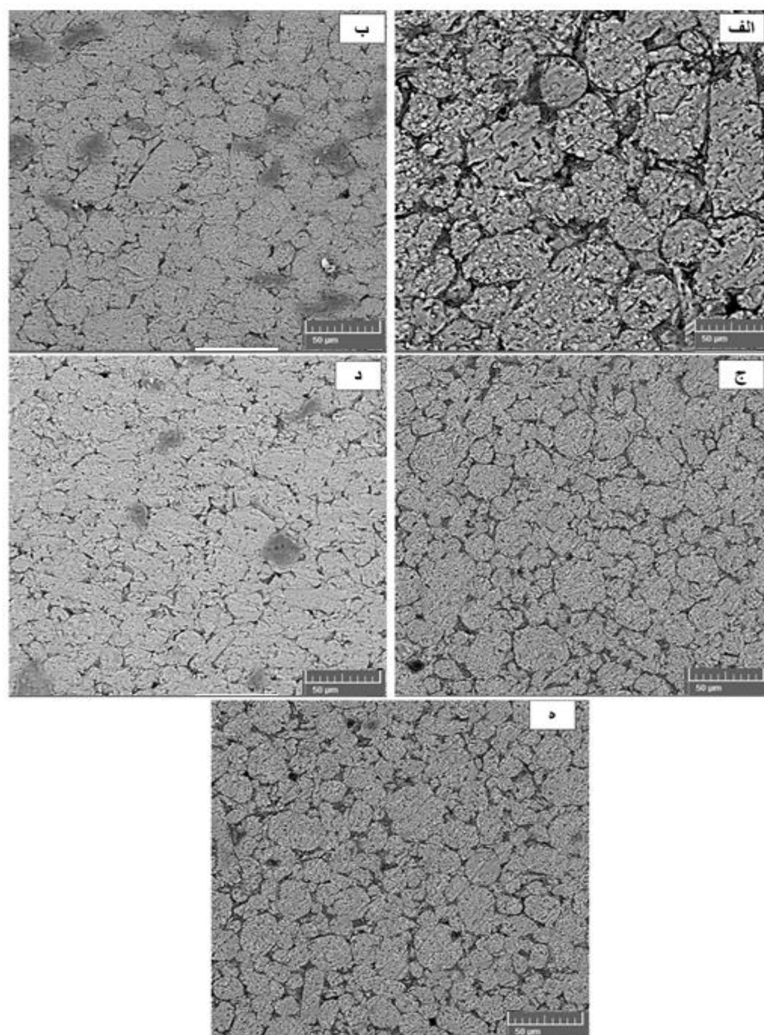
در حین سایش، نانوصفحات گرافن از نانوکامپوزیت جدا می‌شود و یک لایه روان‌کننده روی سطح بین دو ماده ایجاد می‌کند که ضریب اصطکاک را کاهش می‌دهد. هر چه نانو صفحات گرافن به طور یکنواخت در داخل زمینه پخش شوند، سختی نانوکامپوزیت را بیشتر بهبود می‌بخشد و ضریب اصطکاک را کاهش می‌دهد و مقدار سایش را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، برای نانوکامپوزیت‌ها، به دلیل خواص مکانیکی بالاتر آن‌ها، حفظ پایداری لایه اکسید سطحی آسان‌تر است و بنابراین منجر به نوسان نسبتا کمتری می‌شود [23].



شکل ۱ مورفولوژی SEM: (الف) پودر آلومینیوم اولیه، (ب) پودرهای آلیاژ گلوله‌ای آسیاب شده در ۱۰ ساعت به همراه نانوذرات SiC و نانوصفحات گرافن، (ج) نانوذرات SiC و (د) نانوصفحات گرافن



شکل ۲ تصاویر SEM از نانوکامپوزیت تولید شده از: (الف) ۰,۲۵ وزنی، (ب) ۰,۵ وزنی، (ج) ۰. ۷۵ وزنی، (د) ۱ درصد وزنی نانوصفحات گرافن (۰,۵ درصد وزنی SiC برای همه نمونه‌ها)



شکل ۳ تصاویر SEM الکترون برگشتی از سطوح: (الف) آلیاژ آلومینیوم خالص و نانوکامپوزیت‌ها برای درصدهای وزنی مختلف گرافن، (ب) ۰,۲۵ وزنی، (ج) ۰,۵ وزنی، (د) ۰,۷۵ وزنی و (ه) ۱ درصد وزنی

مقادیر میانگین COF برای نانوکامپوزیت‌ها و آلیاژ زمینه AlA380 در جدول (۴) نشان داده شده است، کاهش اندازه ذرات زمینه در مقایسه با تقویت کننده‌ها همچنین COF و نرخ سایش کامپوزیت را کاهش می‌دهد [24]. در این تحقیق، کاهش اندازه ذرات زمینه از طریق آسیاب گلوله‌ای منجر به توزیع همگن تقویت کننده‌ها در زمینه می‌شود و در نتیجه مقاومت به سایش نانوکامپوزیت‌ها را افزایش می‌دهد.

علاوه بر این، نانوکامپوزیت‌های توسعه یافته توسط فرایند آسیاب گلوله‌ای و به دنبال آن SPS با ۰,۵ درصد وزنی نانوصفحات گرافن و ۰,۵ درصد وزنی نانوذرات کاربید سیلسیم، حداکثر مقاومت در برابر سایش را ایجاد می‌کنند. در حالی که ضریب اصطکاک در مورد ۰,۷۵ درصد وزنی و ۱,۰ درصد وزنی محتوای گرافن نسبتا بالا است. این ممکن است به دلیل تجمع گرافن باشد. GNPهایی که در داخل زمینه تجمع می‌یابند به عنوان مراکز تنش در هنگام سایش عمل می‌کنند و باعث می‌شوند که قطعه از آن نقطه شکسته شود. این امر باعث کاهش مقاومت به سایش و افزایش نرخ سایش در نمونه‌های حاوی ۰,۷۵٪ و ۱٪ نانوصفحات گرافن می‌شود.

شکل (۴) مورفولوژی سایش نانوکامپوزیت بررسی شده در شرایط بارگذاری ۱۰ نیوتن را نشان می‌دهد. درجه آسیب سطحی کامپوزیت گرافن/Al A380 با افزایش محتوای تقویت کننده تا ۰,۵ درصد وزنی کاهش می‌یابد. در این حالت، لایه‌های گرافن به سطح می‌آیند و در هنگام سایش به عنوان روان‌کننده عمل می‌کنند و نرخ سایش و ضریب اصطکاک را کاهش می‌دهند. بر اساس این نتایج، هر چه میزان گرافن بیشتر از ۰,۵ درصد وزنی گرافن باشد، میزان سایش ناشی از کاهش سختی و جدا شدن

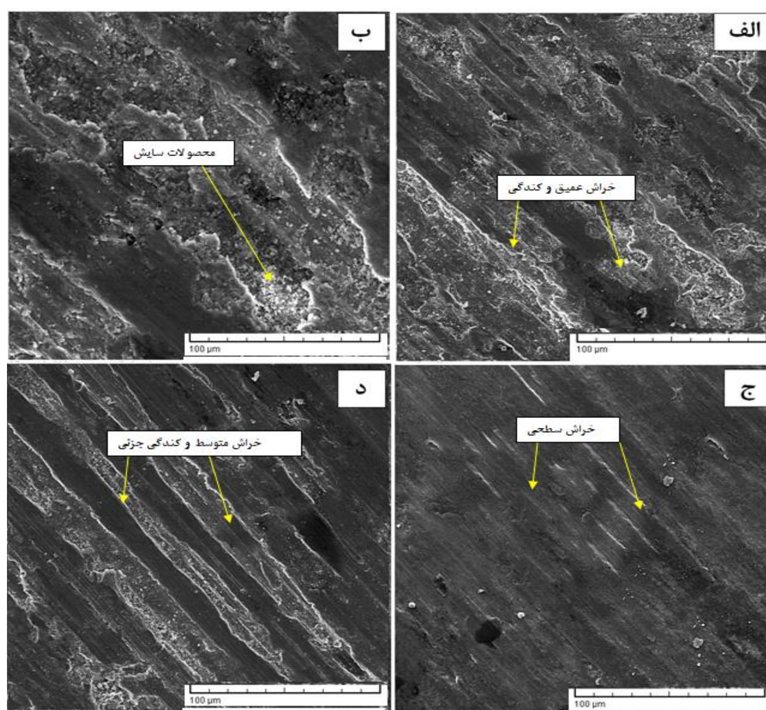
ذرات آگلومره شده که انرژی پیوند ضعیفی با سطح دارند، بیشتر می‌شود، بنابراین روان‌کاری به خوبی انجام نمی‌شود.

به وضوح می‌توان مشاهده کرد که در نمونه‌های حاوی گرافن بیشتر از ۰٫۵ درصد وزنی سایش شدیدتر می‌شود. مانند لایه‌برداری، شیارهای عمیق و تغییر شکل پلاستیک در AlA380 خالص انجام می‌شود. همچنین در مقایسه با نانوکامپوزیت آلومینیوم/ گرافن، شیارهای سایش به طور قابل توجهی وسیع‌تر هستند. در مقایسه، تمام سطوح سایش یافته نانوکامپوزیت‌ها شیارهای کم‌عمق، لایه‌برداری کمتر و مسیر سایش باریک‌تر را نشان می‌دهند. برای نانوکامپوزیت‌های آلومینیوم ـ گرافن با ۰٫۵ درصد وزنی، سطح سایش نسبتا صاف و فشرده است که با تغییر شکل جزئی و شیارهای کم عمق همراه است، که در آن سایش چسبان تقریبا وجود ندارد (شکل ۴-ج). با این وجود، مقداری خیلی کمی محصولات سایش را می‌توان به وضوح در شکل (۴-ج) یافت که وقوع سایش ساینده را در نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با ۰٫۵ درصد وزنی گرافن نشان می‌دهد.

با توجه به سطوح سائیده شده نسبتا سالم و صاف در نانوکامپوزیت حاوی ۰٫۵ درصد وزنی نانوصفحات گرافن، می‌توان استنباط کرد که اکسیداسیون سطح می‌تواند منجر به یک لایه اکسیداسیون متراکم و پایدار شود که نقش مثبتی در محافظت از سطح ایفا می‌کند و منجر به آسیب سایش نسبتا خفیف می‌شود. علاوه بر این، وجود آهن نشان دهنده انتقال مواد از دیسک فولادی به نمونه نانوکامپوزیت است. بر اساس بررسی میکروسکوپی لایه سطحی و محصولات سایش در سیستم سایش لغزشی آلیاژ Al-Si در برابر فولادM2 ، Li et al. [25] خاطرنشان کرد که انتقال مواد از سطح دیسک به سطح سایش کامپوزیت و تشکیل یک لایه مخلوط مکانیکی (MML) در سایش لغزشی خشک اتفاق می‌افتد. یک لایه MML در هنگام سایش لغزشی تشکیل می‌شود و از تقویت کننده‌ها، زمینه و اکسیدهای آن تشکیل شده است.

جدول ۴ ضریب اصطکاک برای آلیاژ AlA380 و نانوکامپوزیت‌ها برای درصدهای وزنی مختلف گرافن

Sample	Coefficient of friction
A380	0.689
Al A380-0.5%SiC-0.25% GNPs	0.521
Al A380-0.5%SiC-0.5% GNPs	0.455
Al A380-0.5%SiC-0.75% GNPs	0.561
Al A380-0.5%SiC-1% GNPs	0.571



شکل ۴ تصاویر SEM از سطوح سائیده شده: (الف) AlA380 خالص، (ب) ۰٫۲۵ درصد وزنیGNP ، (ج) ۰٫۵ درصد وزنی GNP و (ه) ۱٫۰ درصد وزنی GNP تحت بار اعمال شده ۱۰ نیوتن

نتایج سایش برای آلیاژ آلومینیوم A380 برای نمونه‌های اصلاح نشده و نانوکامپوزیت‌ها در جدول (۵) نشان داده شده است. جدول (۵) میزان کاهش وزن را نشان می‌دهد. این نتایج در بار ثابت (۱۰ نیوتن) و سرعت چرخش ثابت دیسک (۲۵۰ دور در دقیقه) به دست آمد. مشاهده می‌شود که با افزایش میزان گرافن میزان کاهش وزن کاهش یافته است. از جدول (۵) مشخص است که افزودن نانوصفحات گرافن و نانوذرات SiC به آلیاژ آلومینیوم A380 کاهش وزن را در مقایسه با آلیاژ آلومینیوم اصلاح نشده کاهش داده است. این را می‌توان به توزیع یکنواخت و پراکندگی نانوصفحات گرافن و نانوذرات SiC در نانوکامپوزیت‌های اصلاح شده با با ۰٫۵ درصد وزنی گرافن توصیف کرد.

جدول ۵ کاهش وزن به عنوان تابعی از مقدار GNP برای انواع مختلف نانوکامپوزیت‌ها

Sample	Weight loss(mg)
A380	6
Al A380-0.5%SiC-0.25% GNPs	2.4
Al A380-0.5%SiC-0.5% GNPs	2
Al A380-0.5%SiC-0.75% GNPs	2.1
Al A380-0.5%SiC-1% GNPs	2.3

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، نانوکامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی A380 تقویت شده توسط GNPs-SiCnp تولید شدند و رفتار ریزساختاری، مکانیکی و تریبولوژیکی این نانوکامپوزیت‌ها بررسی شد. یافته‌های تجربی به شرح زیر خلاصه می شود:

۱. مقدار بهینه نانوذرات ۰٫۵ درصد وزنی GNP است.

۲. هنگامی که درصد وزنی نانوکامپوزیت به بیش از ۰/۵ درصد وزنی برسد. تجمع GNPs در مرز دانه باعث تردی، تخلخل، پیوند سطحی کمتر و در نتیجه کاهش خواص مکانیکی می‌شود.

۳. افزودن تقویت کننده نانویی مقاومت به سایش نانوکامپوزیت‌ها را به میزان قابل توجهی بهبود بخشید.

۴. با این حال، افزایش بیش از حد مقدار گرافن باعث تجمع و آگلومره شدن می‌شود، بنابراین COF و نرخ سایش افزایش می‌یابد.

۵. مقاومت در برابر سایش نانوکامپوزیت‌های تولید شده نسبت به نمونه پایه بیشتر بوده و کاهش وزن نمونه پایه نسبت به نمونه بهینه ۳ برابر می‌باشد. ضریب اصطکاک به دلیل ماهیت خودروان‌کننده گرافن برای نمونه پایه و نانوکامپوزیت حاوی ۰٫۵ درصد وزنی گرافن به ترتیب برابر است با ۰٫۶۸۹ و ۰٫۴۵۵ که نشان دهنده کاهش ضریب اصطکاک می‌باشد. همچنین سختی نمونه‌ها از ۱۰۵ ویکرز برای نمونه پایه به ۱۷۵ ویکرز برای نمونه حاوی ۰٫۵ درصد وزنی گرافن افزایش می‌یابد.

۶. انتقال مکانیزم سایش از ترکیب سایش لایه لایه، سایش چسبان و سایش ساینده به سایش خفیف ساینده با افزایش محتوای تقویت کننده نانوصفحات گرافن تا ۰٫۵ درصد وزنی وجود داشت.

۷. افزایش محتوای گرافن برای تشکیل MML در طول فرایند لغزش خشک مفید بود که نه تنها می‌تواند از سطح ساییده محافظت کند بلکه COF نانوکامپوزیت‌ها را نیز کاهش می‌دهد.

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] S. Stankovich, D. A. Dikin, G. H. B. Dommett, K. M. Kohlhaas, E. J. Zimney, E. A. Stach, R. D. Piner, S. T. Nguyen, R. S. Ruoff, "Graphene-based composite materials," *Nature*, vol. 442, pp. 282–286, 2006. https://doi.org/10.1038/nature04969

[2] R. J. Young, I. A. Kinloch, L. Gong, K. S. Novoselov, "The mechanics of graphene nanocomposites: A review," *Composites Science and Technology*, vol. 72, no. 12, pp. 1459–1476, 2012. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.05.005

[3] F. Y. Chen, J. M. Ying, Y. F. Wang, S. Y. Du, Z. P. Liu, Q. Huang, “Effects of graphene content on the microstructure and properties of copper matrix composites,” *Carbon*, vol. 96, pp. 836-842, 2016. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.10.023

[4] L. Y. Chen, H. Konishi, A. Fehrenbacher, C. Ma, J. Q. Xu, H. Choi, H. F. Xu, F. E. Pfefferkorn, X. C. Li, “Novel nanoprocessing route for bulk graphene nanoplatelets reinforced metal matrix nanocomposites,” *Scripta Materialia*, vol. 67, no. 1, pp. 29-32, 2012. https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2012.03.013

[5] A. D. Moghadam, E. Omrani, P. L. Menezes, P. K. Rohatgi, “Mechanical and tribological properties of self-lubricating metal matrix nanocomposites reinforced by carbon nanotubes and graphene -A review,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 77, pp. 402-420, 2015. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.014

[6] P. K. Dinesh Kumar, S. Darius Gnanaraj, ”Studies on Al-Si based hybrid aluminium metal matrix nanocomposites,” *Materials Today Communications*, vol. 38, p. 108132, 2024. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.108132

[7] S. Kiani, S. E. Mirsalehi, “Friction stir additive manufacturing of B4C and graphene reinforced aluminum matrix hybrid nanocomposites using consumable pins,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 28, pp. 1094-1110, 2024. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.12.065

[8] S. S. Mirian Mehrian, F. Khodabakhshi, M. Rahsepar, M. Mohammadi, A. P. Gerlich, “Electrochemical corrosion characteristics of friction stir-reacted aluminum matrix hybrid nanocomposites,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 28, pp. 1924-1940, 2024. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.12.112

[9] P. Raj, P. L. Biju, B. Deepanraj, N. Menachery, “A systematic review on characterization of hybrid aluminium nanocomposites,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 72, no. 4, pp. 2139-2150, 2023. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.236

[10] X. Li, Y. Yang, “Theoretical and experimental study on ultrasonic dispersion of nanoparticles for strengthening cast Aluminum Alloy A356,” *Metals science and technology-JOM*, vol. 26, no. 2, pp. 12–20, 2008.

[11] R. Abedinzadeh, E. Norouzi, D. Toghraie, “Study on machining characteristics of SiC–Al_2O_3 reinforced aluminum hybrid nanocomposite in conventional and laser-assisted turning,” *Ceramics International*, vol. 48, no. 19, pp. 29205-29216, 2022. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.05.196

[12] M. M. H. Bastwros, A. M. K. Esawi, A. Wifi, “Friction and wear behavior of Al–CNT composites,” *Wear*, vol. 307, no. 1-2, pp. 164–173, 2013. https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.08.021

[13] A. Nieto, H. Yang, L. Jiang, J. M. Schoenung, “Reinforcement size effects on the abrasive wear of boron carbide reinforced aluminum composites,” *Wear*, vol. 390–391, pp. 228–235, 2017. https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.08.002

[14] S. F. Bartolucci, J. Paras, M. A. Rafiee, J. Rafiee, S. Lee, D. Kapoor, N. Koratkar, “Graphene/aluminum nanocomposites,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528, no. 27, pp. 7933– 7937, 2011. https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.07.043

[15] A. El-Ghazaly, G. Anis, H. G. Salem, “Effect of graphene addition on the mechanical and tribological behavior of nanostructured AA2124 self-lubricating metal matrix composite,” *Composites - Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 95, pp. 325–336, 2017. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.02.006

[16] G. Anil Kumar, J. Satheesh, K. V. Shivananda Murthy, H. M. Mallikarjuna, N. Puneeth, Praveennath G. Koppad, "Optimization of Wear Properties of B4C Nanoparticle-Reinforced Al7075 Nanocomposites Using Taguchi Approach," *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, vol. 22, pp. 385-93, 2022. https://doi.org/10.1007/s40033-022-00385-3

[17] H. R. M. Naik, L. H. Manjunath, V. Koti, A. Lakshmikanthan, G. P. Koppad, P. Kumaran., "Al/Graphene/CNT Hybrid Composites: Hardness and Sliding Wear Studies," *FME Transactions*, vol. 49, no. 2, pp. 414-421, 2021. https://doi.org/10.5937/fme2102414N

[18] D. Sethurama, R. Keshavamurthy, S. Paljor, P. E. Rohit, P. G. Koppad, "Effect of multiple reinforcements (CNT/Si3N4) on hardness, electrical conductivity and friction coefficient of aluminium hybrid composites," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1455, no. 1, pp. 12-21, 2020. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1455/1/012011

[19] N. Puneeth, J. Satheesh, V. Koti, P. G. Koppad, M. R. Akbarpour, G. J. Naveen, "Application of Taguchi's method to study the effect of processing parameters of Al6082/B4C/Al2SiO5 hybrid composites on mechanical properties," *Materials Research Express*, vol. 6, no. 10, pp. 10-15, 2019. https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab3c16

[20] S. J. Niteesh Kumar, R. Keshavamurthy, M. R. Haseebuddin, P. G. Koppad, "Mechanical Properties of Aluminium-Graphene Composite Synthesized by Powder Metallurgy and Hot Extrusion," *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 70, pp. 605–613, 2017. https://doi.org/10.1007/s12666-017-1070-5

[21] A. C. Gowda, P. G. Koppad, D. Sethuram, R. Keshavamurthy, "Morphology Studies on Mechanically Milled Aluminium Reinforced with B_4C and CNTs," *Silicon*, vol. 11, pp. 1089–1098, 2019. https://doi.org/10.1007/s12633-018-9905-1

[22] V. Koti, Mahesh, K. V. S. Murthy, P. G. Koppad, D. Sethuram, "Hardness and electrical conductivity of uncoated and silver coated carbon nanotubes reinforced copper nanocomposites," *Sadhana-Academy Proceedings in Engineering Sciences*, vol. 47, no. 3, pp. 179-187, 2022. https://doi.org/10.1007/s12046-022-01949-5

[23] A. O. Adegbenjo, B. A. Obadele, P. A. Olubambi, "Densification, hardness and tribological characteristics of MWCNTs reinforced Ti6Al4V compacts consolidated by spark plasma sintering", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 749, pp. 818-833, 2018. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.03.373

[24] E. A. Diler , R. Ipek, "Main and interaction effects of matrix particle size, reinforcement particle size and volume fraction on wear characteristics of Al–SiCp composites using central composite design," *Composites Part B: Engineering*, vol. 50, pp. 371-380, 2013. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.02.001

[25] X. Y. Li, K. N. Tandon, "Mechanical mixing induced by sliding wear of an Al–Si alloy against M2 steel," *Wear*, vol. 225, pp. 640-648, 1999. https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00021-6